发展性阅读障碍视听时间整合缺陷可能的机制：视听时间再校准能力受损*

王润洲　毕鸿燕

(中国科学院行为科学重点实验室; 中国科学院心理研究所脑科学与学习困难研究中心, 北京 100101)

(中国科学院大学心理系, 北京 100049)

摘 要 发展性阅读障碍的本质一直是研究者争论的焦点。大量研究发现，阅读障碍者具有视听时间整合缺陷。然而，这些研究仅考察了阅读障碍者视听时间整合加工的整体表现，也就是平均水平的表现，却对整合加工的变化过程缺乏探讨。视听时间再校准反映了视听时间整合的动态加工过程，对内部时间表征与感觉输入之间差异的再校准困难则会导致多感觉整合受损，而阅读障碍者的再校准相关能力存在缺陷。因此，视听时间再校准能力受损可能是发展性阅读障碍视听时间整合缺陷的根本原因。未来的研究需要进一步考察发展性阅读障碍者视听时间再校准能力的具体表现，以及这些表现背后的认知神经机制。

关键词 发展性阅读障碍, 视听时间整合, 视听时间再校准, 动态加工, Bayesian 理论

1　引言

在学校教育中，对阅读能力的培养是教学的核心之一。良好的阅读能力对个体自身的发展以及国民整体文化素养的提升具有非常重要的作用。然而，一些个体的阅读能力明显低于同年龄应有的水平，被称为发展性阅读障碍(developmental dyslexia, DD)。这是一种个体在智力正常，不缺乏学校教育和接触社会文化的机会，并且没有视、听觉功能障碍的情况下，仍然难以习得流畅阅读的缺陷(Casini et al., 2018)。阅读障碍会给个体带来广泛的负面影响，经历过阅读失败的儿童常伴随行为、社会、学业和心理方面的问题(Anthony & Lonigan, 2004)。因此，探索 DD 发生的本质是关键且迫切的研究课题，这对 DD 人群的早期筛查和后续的干预治疗具有重大的理论及现实意义。

阅读是整合视觉和听觉通道输入信息的过程(Pammer & Vidyasagar, 2005)，个体整合听觉语音和视觉文字符号之间对应关系的能力与阅读能力联系密切(Ehri, 2005)。时间因素(例如: 同步性, 持续时间, 速度和韵律结构)在整合视、听言语信号方面具有重要作用(Fujisaki et al., 2004; Van Wassenhove et al., 2007)，时间整合也是多感觉整合的基础(Lewkowicz, 1992,

收稿日期：2022-01-26

* 国家自然科学基金面上项目(31671155), 中国科学院行为科学重点实验室经费资助(Y5CX052003)。

通信作者: 毕鸿燕, E-mail: bihy@psych.ac.cn

1994, 1996)。视听时间整合(audiovisual temporal integration)是指个体将时间异步的视听刺激整合为一个有意义的独立事件的过程(Stevenson et al., 2012; Stevenson & Wallace, 2013; 李涛涛 等, 2018)。时间整合窗口(temporal binding window, TBW, Arrighi et al., 2006)以及同步反应概率(e.g., Francisco, Groen et al., 2017)、时间知觉阈限(例如: 最小可觉差, Mossbridge et al., 2017)等能体现整合窗口大小的指标，可以反映视听时间整合能力。由于合适的视听 TBW 对学习阅读时正确绑定语音–字符非常重要，所以视听时间整合也是阅读的一个关键组成部分(Gori et al., 2020)。研究发现，DD 个体的视听时间整合能力受损，常表现为视听 TBW 异常增宽，难以分离异步刺激，即使跨通道视听刺激的异步时间较长，仍然感知二者是同时发生的(Francisco et al., 2014; Francisco, Jesse et al., 2017; Hairston et al., 2005; Virsu et al., 2003)。但是，现有的研究仅从整体，即平均水平层面考察 DD 个体视听时间整合加工的表现(e.g., Francisco et al., 2014; Francisco, Jesse et al., 2017; Hairston et al., 2005; Laasonen et al., 2002; Virsu et al., 2003)，并没有探讨 DD 个体视听时间整合加工的变化过程。视听时间再校准(audiovisual temporal recalibration)作为大脑对视觉和听觉通道输入信息之间的短暂时间延迟进行动态适应的过程，可以体现这种变化：当输入的视听刺激不同步时，大脑将对视听刺激的时间同步感知朝异步方向，即朝先呈现刺激的通道进行调整，促进其知觉为一个整体事件(Keetels & Vroomen, 2007; Van der Burg et al., 2013)。多感觉整合加工过程中的时间再校准也可以反映 TBW 的动态变化，包括时间窗口扩大、主观同时点(the point of subjective simultaneity, PSS)偏移以及时间窗口恢复三个阶段(Navarra et al., 2005, 2007, 2009)。阅读障碍的相关研究发现，在行为层面，DD 个体存在言语层面的语音再校准缺陷(Keetels et al., 2018)。在神经层面，DD 个体的神经适应能力弱于正常阅读者(Jaffe-Dax et al., 2018; Perrachione et al., 2016; Peter et al., 2019)，而时间再校准正是对时间异步的适应能力(Noel et al., 2017)。因此，视听时间再校准缺陷可能是 DD 视听时间整合缺陷背后更基础的认知神经机制。

本文首先系统地回顾 DD 视听时间整合缺陷的研究，通过分析现有研究的局限和近似领域研究的结果，推测 DD 视听时间整合缺陷背后更基础的认知神经机制可能是视听时间再校准能力受损。然后，阐述视听时间再校准与视听时间整合的关系，说明视听时间再校准如何影响视听时间整合。接着，梳理 DD 再校准相关能力受损的研究，为其可能存在视听时间再校准缺陷提供证据支持。最后，总结全文，对未来 DD 视听时间再校准能力的研究方向进行展望。

2 发展性阅读障碍的视听时间整合缺陷

2.1 发展性阅读障碍视听时间整合缺陷的行为表现

Virsu 等(2003)采用两项任务探讨了 DD 成人的视听时间加工能力从 20 岁到 59 岁的发展状况。在时间顺序判断(temporal order judgment, TOJ)任务中，以不同时间间隔(stimulus onset asynchrony, SOA)呈现非言语视听刺激，要求被试判断哪个通道的刺激先呈现。在时间加工敏感性(temporal processing acuity, TPA)任务中，被试需要判断视听跨通道刺激是否同时呈现。两项任务均以时间知觉阈限表示视听时间整合能力。结果发现，无论年龄大小，DD 个体在两项任务中的时间知觉阈限都显著高于正常阅读者，并且这种加工缺陷会随着年龄的增长进一步加重(Virsu et al., 2003)。随后，Hairston 等(2005)使用与时间顺序判断任务相似的时间腹语任务，并以非言语刺激为材料考察了阅读障碍成人的视听时间整合窗口。在时间腹语任务中，每个试次(trial)的视觉刺激和听觉刺激各有两个。其中，第一个视、听刺激同时呈现；第二个视觉刺激与第一个视觉刺激的 SOA 由被试各自的辨别阈限决定并保持不变；第二个听觉刺激与第二个视觉刺激的 SOA 以 50 ms 为步长在 0~350 ms 的范围内随机选择。两个视觉刺激在注视点上方和下方各呈现一次，要求被试判断第一个视觉刺激呈现的位置。结果发现，在对照组中，相较于基线的单视觉刺激条件，第二个听觉刺激对视觉刺激顺序判断的促进作用在 SOA 大于 200 ms 后消失。而阅读障碍组在 SOA 为 350 ms 时仍然表现出促进作用。这说明阅读障碍者的视听 TBW 比正常阅读者更宽。研究者认为，扩展的时间整合窗口将导致个体难以快速、准确地整合来自多个感觉通道的线索。具体而言，在阅读过程中，神经系统必须适当地绘制单词视觉元素(例如: 字母)与相应听觉元素(例如: 音素)的表征。而这种映射时间窗口的扩大会导致不恰当的对应关系，最终表现为字母–音素的映射错误，从而造成阅读时解码的速度和准确性下降(Hairston et al., 2005)。不同于先前研究仅使用非言语刺激作为实验材料，Francisco 等(2014)同时使用言语和非言语刺激考察阅读障碍成人的视听时间敏感性。在非言语刺激的同时性判断(simultaneity judgment, SJ)任务中，被试需要判断拍手动作与拍手声音是否同时发生。在言语刺激的 McGurk 同步判断任务中，被试需要判断音节/apa/的发音和音节/aka/的口型动作是否同时发生。以被试在不同 SOA 条件下的同步反应概率拟合高斯函数得到的 TBW 作为反映视听时间整合能力的指标。结果发现，与正常成人相比，阅读障碍成人整合言语视听刺激时有更宽的 TBW，即对言语刺激的视听时间整合存在缺陷。但是，对于整合非言语视听刺激，两组被试的 TBW 没有显著差异。研究者认为，阅读障碍者的视听时间整合缺陷是一种持续的状态，可以延

续到成人阶段，而不是与阅读习得有关的短暂发展滞后。对于非言语条件下两组被试的视听 TBW 没有显著差异的原因，研究者指出：一方面可能是因为非言语的拍手刺激比言语刺激更简单，使得阅读障碍者更容易进行同步判断，从而消除了组间差异。另一方面可能是因为该研究使用的任务与 Hairston 等(2005)使用的基于顺序判断的时间腹语任务不同。顺序判断侧重于个体对视听刺激的解离，相比于同时性判断，更容易受到反应策略的影响，难以准确反映整合加工(Francisco et al., 2014)。接着，Francisco, Jesse 等(2017)在其 2014 年研究的基础上纳入了更多的阅读障碍成人，并增设了 McGurk 识别任务，即被试需要判断音节/apa/的发音和音节/aka/的口型动作在整体感知上是/apa/、/aka/还是融合音节/ata/。结果发现，在使用言语刺激的 McGurk 同步判断任务和非言语刺激的同时性判断任务中，阅读障碍者的视听 TBW 都显著宽于正常阅读者。表明他们不仅在加工言语刺激时有视听时间整合缺陷，对更一般的非言语刺激也存在视听时间整合缺陷。不过，在 McGurk 识别任务中，阅读障碍者的视听 TBW 与正常阅读者无显著差异。研究者认为，阅读障碍者视听 TBW 的异常增宽不仅会导致学习字母–声音映射的困难，还反映了他们在信息采集方面存在困难，即需要扩展 TBW 弥补感觉加工的缺陷。而阅读障碍者视听跨通道的言语同步判断与言语知觉融合结果的分离可能与任务的性质及其涉及的加工过程有关。具体来说，阅读需要有意识地映射字母–声音的对应关系并感知它们的同步状态。而在 McGurk 识别任务中，来自两个通道的信息被自动整合成独立的整体感知。所以被试在 McGurk 识别任务中进行内隐的时间同步判断，但在阅读时进行外显的时间同步判断。因此，阅读障碍者在习得字母–声音对应关系方面存在缺陷的一个核心问题可能是难以作出外显的时间同步判断，而涉及内隐的时间同步判断的 McGurk 识别任务不能探查出这一缺陷(Francisco, Jesse et al., 2017)。Francisco, Groen 等(2017)再次扩大样本，使用相同的三项任务考察视听时间敏感性对阅读的影响。该研究以被试在每个 SOA 条件下的同步反应或融合反应概率的均值作为时间整合指标，反应概率越高代表 TBW 越宽。结果却发现，在全部三项任务中，阅读障碍成人的反应概率与正常阅读者均没有显著差异。但是，研究者并没有给出与先前研究结果(e.g., Francisco et al., 2014; Francisco, Jesse et al., 2017)不一致的解释，只是强调视听时间敏感性独特地解释了阅读表现的方差变异。被试作出更多同步判断时，错误阅读的数量也更多(Francisco, Groen et al., 2017)。近期，武慧多(2020)招募汉语 DD 儿童进行了一系列的视听时间敏感性研究，发现 DD 儿童在同时性判断任务中的视听同时性窗口比正常儿童更宽，表明汉语 DD 儿童的视听时间整合能力存在缺陷。这一结果也与拼音文字的研究结果一致。

综合行为研究的结果可以看出，阅读障碍者的视听时间整合能力弱于正常发展阅读者，

并且这种现象存在跨越语言、年龄和刺激类型的一致性。研究者试图以实验材料和任务性质的不同来解释部分不一致的实验结果(e.g., Francisco et al., 2014; Francisco, Groen et al., 2017; Francisco, Jesse et al., 2017; Laasonen et al., 2002)，例如：非言语刺激比言语刺激更简单更容易判断，从而消除了组间差异(e.g., Francisco et al., 2014)、时间同步的内隐判断任务(McGurk 识别任务)无法探查出视听时间整合缺陷(e.g., Francisco, Jesse et al., 2017)等。然而，现有研究的结果并不完全支持这些解释。具体来说，尽管上述研究发现阅读障碍者在 McGurk 识别任务中的 TBW 与正常阅读者无显著差异(e.g., Francisco, Groen et al., 2017; Francisco, Jesse et al., 2017)，但是 Woynaroski 等(2013)使用 McGurk 识别任务探查出了视听时间整合能力的损伤。因此，McGurk 识别任务可以用于视听时间整合缺陷的考察，说明任务性质的不同并不是造成研究结果间存在差异的本质原因。此外，这些解释也无法合理地说明为什么采用相同的实验材料和实验任务会产生不同的结果[例如: Francisco, Groen 等(2017)和 Francisco, Jesse 等(2017)、Hairston 等(2005)和 Laasonen 等(2002)]。上述争论表明 DD 个体的视听时间整合缺陷可能存在没有被揭示的关键影响因素。已有研究发现，平均水平上正常的多感觉整合行为表现背后仍然可能存在整合加工过程的缺陷(e.g., Noel et al., 2017; Zaidel et al., 2015)。并且，体现整合加工过程的时间再校准指标比 TBW 等整体指标更能敏感地反映出视听时间整合能力的差异(e.g., Noel et al., 2017)。这些研究结果提示，无论 DD 个体在平均水平上的视听时间整合能力是否表现出缺陷，反映整合加工过程的视听时间再校准能力都可能存在缺陷。本文将在 2.3 节进一步讨论这一问题。

2.2 发展性阅读障碍视听时间整合缺陷的神经表现

Froyen 等(2011)运用 EEG 技术，以失匹配负波(mismatch negativity, MMN)为指标考察阅读障碍儿童对字母–语音联结的跨通道加工能力。视觉刺激为字母“a”，听觉标准刺激为音素“/a/”(85%)，听觉新异刺激为音素“/o/”(15%)。在听觉单通道条件下，只向被试呈现听觉标准刺激和新异刺激。在视听跨通道条件下，视听刺激有两种呈现方式。一种是同时呈现，另一种是视觉刺激先于听觉刺激 200 ms 呈现。实验采用被动任务，要求被试对屏幕中央随机呈现的探测刺激进行按键反应以保持注意。结果发现，正常儿童在视听异步条件下诱发的 MMN 平均波幅显著大于听觉单通道条件，但同年龄阅读障碍儿童在这两种条件下诱发的 MMN 平均波幅没有显著差异，表明阅读障碍儿童难以自动整合字母和语音(Froyen et al., 2011)。Mittag 等(2013)使用相似的研究范式，发现正常成人在视听同步条件下诱发的 MMN 显著大于视听异步条件，但阅读障碍成人在这两种条件下诱发的 MMN 没有显著差异，表明 DD 个体的视听时间整合缺陷在成年阶段仍然存在。fMRI 研究发现，个体

视听时间整合的相关脑区位于双侧额顶叶网络、颞上皮层(superior temporal cortex, STC)和视觉、听觉皮层(e.g., Adhikari et al., 2013; Binder, 2015; Dhamala et al., 2007; Noesselt et al., 2007)。并且经过视听跨通道时间同步感觉训练后，后颞上沟(posterior superior temporal sulcus, pSTS)和视觉、听觉皮层之间的静息态功能连接显著增强(Powers et al., 2012)。但是，现有针对阅读障碍的 fMRI 研究侧重于考察对同时出现的形–音刺激的整合能力(e.g., Blau et al., 2009, 2010; Rüsseler et al., 2018)，而没有考察时间整合能力。不过，一项综述研究(Stevenson et al., 2016)指出，同样普遍具有视听时间整合缺陷的群体(例如: 自闭症, ASD)，其多感觉时间整合缺陷的神经基础也位于后颞上沟。因此，视听时间整合缺陷可能与视觉、听觉皮层和颞叶皮层等区域的激活异常有关。

2. 3 当前发展性阅读障碍视听时间整合研究的局限

研究表明，视听 TBW 在整合加工过程中不是固定不变的，而是动态变化的，包括时间窗口扩大、主观同时点偏移以及时间窗口恢复三个阶段，即时间再校准(Navarra et al., 2005, 2007, 2009)。这种时间窗口的扩大和缩小取决于先前感觉体验的影响(Powers et al., 2009)，并且时间再校准能够在很短的时间内(例如: 一个试次)发生，即快速时间再校准(rapid temporal recalibration, Van der Burg et al., 2013)。然而，当前针对 DD 视听时间整合的行为研究均以被试在不同实验条件下全部测验结果的均值来计算视听 TBW 及其相关指标(e.g., Francisco et al., 2014; Francisco, Jesse et al., 2017; Hairston et al., 2005; Laasonen et al., 2002; Virsu et al., 2003)，神经研究也均以被试在不同实验条件下大脑激活强度的整体叠加平均值进行比较(e.g., Froyen et al., 2011; Mittag et al., 2013)，只能考察 DD 个体视听时间整合加工的整体表现，也就是平均水平的表现，并不能探查 DD 个体视听时间整合加工的动态变化过程。De Niear 等(2017)对正常个体的研究发现，TBW 会随实验的进行显著缩小。并且这种在视听时间整合加工中 TBW 不断缩小的变化过程已被许多训练研究所证实。在经过一次有反馈的视听同时性判断训练后，个体的 TBW 就会显著缩小，体现了 TBW 在视听时间整合过程中的可塑性(e.g., Powers et al., 2009, 2012; Theves et al., 2020)。此外，Noel 等(2016)指出，快速时间再校准和视听时间整合有内在联系，可以影响时间整合表征(整合时间窗)的形成。因此，以往研究中 DD 个体的视听时间整合窗口在整体上，或者说在平均水平上异常增宽的本质，就可能是在整合过程中难以通过快速的时间再校准重塑 TBW 的大小，即存在快速视听时间再校准缺陷。

此外，也有研究发现，即使个体在平均水平上具有完好的多感觉整合表现，但整合加工的过程也会存在异常。Zaidel 等(2015)考察了 ASD 患者对视觉与前庭觉(vestibular)线索的

多感觉整合过程。在黑暗的环境中，被试站在以不同角度向左前方或右前方移动的平台上，视觉刺激是完全随机运动的光点(纯噪音)，被试需要判断自己是朝左前方还是右前方运动。实验总共包含 4 个相似的组块(block)，用来考察被试在不同阶段的多感觉整合能力。研究者将 4 个组块的整合成绩作为整体，比较平均水平的表现时发现，ASD 患者的整合阈限与正常个体不存在显著差异，即具有完好的多感觉整合能力。但是将 4 个组块的整合成绩分开比较时则发现，ASD 患者在初始阶段的整合表现优于正常个体。而正常个体则是随着实验的进行表现出显著的学习效应，并在第四个组块获得了最优的整合。相比之下，ASD 患者的整合表现并没有随实验的进行发生显著变化。进一步分析发现，随着实验的进行，正常个体会不断降低视觉通道信息的权重值，而 ASD 患者没有这种表现。因此，研究者认为 ASD 患者的多感觉整合缺陷是因为他们的先验知识(prior knowledge)衰减，多感觉整合更多依靠当前传入的感觉信息所造成的。由于视觉刺激是纯噪音，在实验的初始阶段，ASD 患者更好地感知了当前的刺激并进行整合，而先前的感觉经验干扰了正常个体的整合加工。随着实验的进行，正常个体的多感觉整合会随着经验的积累灵活校准，而 ASD 患者的加工策略则是静态的，难以根据先前的感觉体验灵活地调整多感觉整合(Zaidel et al., 2015)。类似的，Noel 等(2017)使用同时性判断任务考察了 ASD 患者的快速视听时间再校准能力。结果发现，虽然 ASD 患者在整合非言语刺激时的 TBW 与正常个体无显著差异，但是反映快速视听时间再校准能力的主观同时点偏移(ΔPSS)却显著小于正常个体，表明 ASD 患者存在快速视听时间再校准缺陷(Noel et al., 2017)。上述两项研究结果表明，平均水平上正常的多感觉整合表现背后可能存在加工过程中的再校准缺陷。尽管这些研究证据和解释都来自于 ASD 个体，但 ASD 和 DD 同属于神经发育性障碍， ASD 个体也被发现具有阅读能力损伤(e.g., O’Connor & Klein, 2004; Patti & Lupinetti, 1993)。在 Noel 等(2017)的研究中，ASD 患者与阅读有关的词汇测试成绩也显著低于正常个体。同时，ASD 个体视听时间整合缺陷的行为表现和神经基础与 DD 个体有许多相似之处(for review, see Zhou, Cheung, & Chan, 2020)。因此，ASD 的研究结果可以为 DD 的研究提供启示。此外，近期一项针对正常人群的研究发现，尽管青少年和成人在反映视听时间整合平均水平的 TBW 大小上没有差异，但是青少年的快速视听时间再校准能力却弱于成人(Zhou, Shi et al., 2020)。综上所述，这些研究结果表明：一方面，正常的多感觉整合整体表现，或者说平均水平上正常的多感觉整合表现背后仍然可能存在整合加工过程的缺陷；另一方面，体现整合加工过程的时间再校准指标比 TBW 等整体指标更能反映出视听时间整合能力的差异。这也为此前在平均水平上没有发现 DD 个体 TBW 异常增宽的研究结果(e.g., Francisco et al., 2014; Francisco, Groen et al., 2017;

Francisco, Jesse et al., 2017; Laasonen et al., 2002)提供了一个合理的解释方向，即 DD 个体正常的 TBW 指标背后可能存在反映加工过程受损的快速视听时间再校准缺陷。

3 视听时间再校准与视听时间整合的关系

多感觉整合的必要条件是跨通道成对刺激保持时间上的同步性(Meredith et al., 1987; 袁祥勇, 黄希庭, 2011)。表面上看，似乎只有同时呈现的跨通道信息才会引起多感觉整合。但是，视、听觉刺激的物理传导速度存在差异(例如: 空气中光的速度远快于声音)，无法同时到达相应的感觉器官；并且听觉刺激的神经传导速度又快于视觉刺激(Vroomen & Keetels, 2010)。因此，即使跨通道的视听刺激同时呈现，在感觉上也会有时间延迟。为了解决这一问题，多感觉时间功能具备了高度动态的特征，可以根据不同的感觉输入进行适应性调整(for a review, see Vroomen & Keetels, 2010)。具体来说，视听时间加工会根据先前的感觉体验灵活变化。当个体处在一个视听异步的环境时，主观同时点就会向先呈现刺激的感觉通道偏移，从而减少感知上的不同步(Fujisaki et al., 2004)。这一过程被称为视听时间再校准(e.g., Van der Burg et al., 2015)，常以视觉领先条件与听觉领先条件主观同时点的偏移量(e.g., Harvey et al., 2014; Noel et al., 2017)和 TBW 的变化量(e.g., De Niear et al., 2017; Noel et al., 2016; Zhou, Shi et al., 2020)为指标反映。其作用是通过时间再校准降低刺激间延迟对多感觉整合的影响，这体现了多感觉整合在时间维度上的可塑性(Yu et al., 2009)。最终效果是使时间异步的跨通道刺激重新被知觉为是同时发生的，即重塑同时性知觉(袁祥勇, 黄希庭, 2011)。并且快速视听时间再校准这种短期的可塑性，即迅速适应环境变化的能力，在视听时间整合中也具有重要作用(Noel et al., 2017)。研究发现，个体的快速视听时间再校准能力与视听时间整合能力之间存在显著的相关关系(Harvey et al., 2014; Van der Burg et al., 2013)。一项横断研究(Noel et al., 2016)显示，个体对言语和非言语视听刺激的时间整合能力都与相应的快速时间再校准能力显著相关，且快速视听时间再校准能力的成熟早于视听时间整合能力。研究者认为，因为视听时间再校准能力和视听时间整合能力具有内在联系，快速视听时间再校准能力代表一种动态的加工过程，可以影响更稳定的时间整合表征的形成(Noel et al., 2016)。

多感觉再校准对多感觉整合的影响还可以用 Bayesian 理论来解释。一项发表在 *Nature* 上的研究(Ernst & Banks, 2002)发现，将被试在视觉或触觉单通道条件下对物体高度的估计带入 Bayesian 模型进行预测的结果与被试在视觉–触觉整合实验中的表现非常相似，表明人类跨通道的信息整合遵循最优的 Bayesian 统计原则(Ernst & Banks, 2002)。在 Bayesian 理论

的框架下，大脑通过感知不同通道信息之间的关系形成对各通道信息可靠性的估计，然后利用这些先验知识与当前感觉通道输入的刺激进行比较，并调节多感觉整合过程中各通道信息的权重，进而优化决策(图 1, Ernst & Bülthoff, 2004)。时间再校准可以看作是适应跨通道刺激之间时间异步的动态加工过程，个体在动态的背景下重新建立关于时间关系的稳定先验知识，这种先验知识又会影响随后不同时间关系下的多感觉整合(Noel et al., 2016; Sato & Aihara, 2011; 袁祥勇 等, 2012)。具体来说，已经建立的先验知识可以产生自上而下的预测，这种由内部感觉表征引起的预测和当前感觉输入之间的差异可以通过再校准实现最小化，从而优化整合(Noel et al., 2017)。对于异常的再校准加工如何损害多感觉整合，Pellicano 和 Burr (2012)的综述提出，衰减的先验知识会导致一种主要基于当前传入的感觉信息，而不是在过去感觉经验的背景下感知外界的倾向。这可能是特殊人群(例如: ASD)在多感觉整合加工过程中具有异常表现的原因。具体而言，多感觉再校准能力的损伤会削弱先验知识的表征，这种先验知识的衰减会赋予当前传入的感觉线索更大的权重，进而使个体更依赖当前的感觉线索进行判断。与此同时，由于没有足够的感觉参照来对比输入的信息，个体将更加难以对内部表征与感觉输入之间的差异进行再校准，进一步导致多感觉整合加工受损(Noel et al., 2017)。综上所述，视听时间再校准能力受损的个体可能在视听时间整合的动态加工过程中难以校准已有的内部表征与当前感觉输入之间跨通道时间关系的差异，从而影响稳定的 TBW 的形成。由于异常的视听 TBW 会导致大脑整合视、听刺激的能力受损，使字母–语音的配对关系变得模糊，进而影响阅读。因此，快速视听时间再校准缺陷可能是 DD 视听时间整合缺陷背后更基础的认知神经机制。

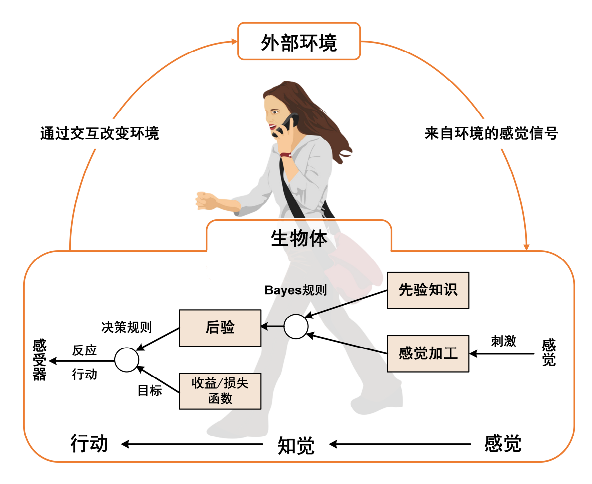


图 1 Bayesian 框架下的感觉–行动循环(改编自 Ernst & Bülthoff, 2004)。

4　发展性阅读障碍再校准相关能力的研究

目前尚未有研究直接考察 DD 个体的视听时间再校准能力，但是先前与再校准能力相

关的研究可以为DD个体存在视听时间再校准缺陷提供证据。行为层面的研究发现，DD个体存在语音再校准缺陷。Keetels 等(2018)招募阅读障碍成人，考察了他们的语音再校准能力。研究者通过调整辅音音节/aba/和/ada/的第二共振峰，将其制作成一组 9 个音节的连续体(A1-A9)。视觉刺激是三个字母："aba"(Vb)或"ada"(Vd)。实验首先连续呈现 8 次字母和音节的组合(例如: VbA1)，随后三种声音(A4, A5, A6)分别随机呈现两次，要求被试判断每个声音更接近于音节/aba/还是/ada/。结果发现，当呈现模糊的字母–声音组合(例如: VbA5 或 VdA5)后，阅读障碍组的再校准能力显著弱于控制组。随后，研究者将辅音音节替换为元音音节，同样发现阅读障碍组的再校准能力显著弱于控制组。该研究结果表明，阅读障碍者存在言语层面的语音再校准缺陷，可能会导致其在学习和应用字母–声音联结方面的困难(Keetels et al., 2018)。近期，Ozernov-Palchik 等(2021)使用相似的范式发现，这种语音适应能力在 DD 儿童和成人中都显著弱于年龄匹配的正常发展个体。由于时间加工是语音加工的感知觉基础(Kotz & Schwartze, 2010)，并且异常的视听跨通道时间加工会干扰构建字母–语音的配对关系(Francisco et al., 2014; Froyen et al., 2008; Wallace & Stevenson, 2014; Zhou, Cheung, & Chan, 2020)，DD个体语音再校准能力的研究结果可以从侧面为DD人群存在视听时间再校准缺陷提供支持。此外，Gori 等(2020)使用时间二分任务考察了 DD 儿童对多感觉刺激的时间表征。实验中每个试次包含以不同 SOA 连续呈现的三对视听刺激，要求被试判断第二对刺激在时间上更接近第一对刺激还是第三对刺激。结果发现，阅读障碍儿童在第二对刺激是视觉材料先呈现时的实际任务表现与 Bayesian 模型的预测结果存在显著差异，并且阅读障碍儿童的差异大于正常儿童(Gori et al., 2020)。该研究结果反映了阅读障碍者不能按照最优的 Bayesian 统计原则整合跨通道的视听时间信息。那么，基于 Bayesian 的先验衰减理论(e.g., Noel et al., 2017; Pellicano & Burr, 2012)可以推测，这可能是因为阅读障碍者难以对时间关系的内部表征和感觉输入之间的差异进行再校准，导致的视听时间整合能力受损。

神经层面的研究(Perrachione et al., 2016)发现，即使相同的视听刺激不断重复，阅读障碍者大脑的激活水平仍然较高，且这一现象在其对言语和非言语视听刺激的加工中都存在。研究者将这一现象解释为阅读障碍者对跨通道视听刺激的快速神经适应能力降低(Perrachione et al., 2016)。后续 Jaffe-Dax 等(2018)的研究则发现，与 DD 快速适应能力衰减有关的脑区位于左侧颞上皮层，包括听觉皮层。这与视听时间整合加工对应的脑区相同(e.g., Dhamala et al., 2007; Noesselt et al., 2007)。由于 DD 个体的快速神经适应能力弱于正常阅读者，而快速时间再校准是对时间异步的快速适应能力，这也提示 DD 人群的快速视听

时间再校准能力可能存在损伤。

5 总结与展望

综上所述，先前的研究从行为和神经层面发现阅读障碍者的视听时间整合能力弱于正常发展阅读者，并且这种现象存在跨越语言、年龄和刺激类型的一致性，是一种普遍的损伤。这为DD人群存在视听时间整合缺陷提供了支持。然而，当前针对DD视听时间整合缺陷的行为研究均以被试在不同实验条件下全部测验结果的均值来计算视听TBW及其相关指标，神经研究也均以被试在不同实验条件下大脑激活强度的整体叠加平均值进行比较，仅能考察DD个体视听时间整合加工的整体表现，也就是平均水平的表现，并不能考察DD个体视听时间整合加工的变化过程，因此难以反映 DD 视听时间整合缺陷的本质。对视听时间再校准这种反映视听时间整合加工过程的研究则可以弥补这种不足。时间再校准反映了个体适应不同异步时间的动态加工过程，即通过重新建立时间关系的稳定先验知识影响随后的多感觉整合。多感觉再校准能力的损伤则会削弱先验知识的表征，并且基于 Bayesian 的先验衰减理论认为，衰减的先验知识会使个体没有足够的感觉参照来对比当前输入的信息，进而难以对内部表征与感觉输入之间的差异进行再校准，造成多感觉整合加工受损。此外，其他领域的研究发现，平均水平上正常的视听时间整合表现背后也会存在反映整合加工过程异常的快速视听时间再校准缺陷。因此，DD视听时间整合缺陷背后可能存在更基础的视听时间再校准能力受损。目前，尚未有研究直接对 DD 人群的视听时间再校准能力进行探索，未来可以从以下几个方面展开研究。

5.1 发展性阅读障碍者视听时间再校准能力在不同时间尺度上的表现

Van der Burg 等(2015)的研究考察了由长期适应引起的视听时间再校准和快速视听时间再校准是共同的还是独立的过程。在实验中，首先向被试呈现具有固定异步时间的视听刺激，持续 3 分钟(适应阶段)，然后被试需要完成视听同时性判断任务(测试阶段)。结果发现，在测试阶段，前一个试次视听刺激不同的呈现通道顺序，会使当前试次的主观同时点发生显著的偏移，即存在快速视听时间再校准。然而，这种偏移在时间进程中没有显著的变化，表明快速视听时间再校准效应在测试阶段保持不变。对于由长期适应引起的时间再校准，主观同时点的偏移在时间进程中发生了显著的变化，视听时间再校准效应随着时间的推移逐渐衰减。这些结果说明视听时间再校准不仅受测试阶段前一个试次视听刺激呈现通道顺序的影响，也受适应阶段视听刺激呈现通道顺序的影响，并且由长期适应引起的视听时间再校准和快速视听时间再校准是相互独立的过程(Van der Burg et al., 2015)。目前仅有考察

ASD个体快速视听时间再校准能力的研究。Turi等(2016)和Noel等(2017)的研究发现，ASD患者不能对简单的和非言语的视听异步刺激进行快速时间再校准。未来可以考察 DD 人群的视听时间再校准能力在不同时间尺度上的表现。由上述研究结果可以提出假设：DD个体在两个时间尺度上都存在视听时间再校准缺陷，表现为视听时间整合很难受到长期适应情境和前一个试次中视听刺激呈现通道顺序的影响，主观同时点的偏移量和(或)TBW 变化量显著小于正常阅读者。

5.2 发展性阅读障碍者视听时间整合窗口和视听时间再校准效应的变化过程

视听时间整合窗口在整合加工过程中是动态变化的(Navarra et al., 2005, 2007, 2009)。对同样具有视听时间整合缺陷的 ASD 患者的研究发现，他们在多感觉整合任务的初始阶段表现良好。但随着时间的推移，ASD 患者难以根据先前的感觉体验调整多感觉整合加工，造成后续阶段的整合表现差于正常人群(Zaidel et al., 2015)。先前有研究发现阅读障碍者在平均水平上的视听时间整合窗口大小与正常阅读者没有差异，可能就是因为初始阶段良好的整合表现掩盖了后续加工过程的缺陷。未来的研究可以参考 Van der Burg 等(2015)和 De Niear 等(2017)使用的滑动窗口法，逐个试次拟合高斯曲线得到随着实验进行而不断变化的 TBW 和主观同时点的偏移量，从而考察 DD 个体视听时间整合窗口和视听时间再校准效应随时间的变化过程。参考已有的研究结果可以假设：（1）在实验的初始阶段，DD 个体 TBW 的宽度与正常阅读者没有显著差异，甚至更窄。随着实验的进行，DD个体 TBW 的宽度将逐渐超过正常阅读者。（2）对于由长期适应引起的视听时间再校准效应，DD个体的再校准效应相较于正常阅读者随时间的推移衰减得更快。（3）对于快速视听时间再校准效应，DD 个体和正常阅读者的再校准效应都不会随时间的推移发生显著变化，但 DD 个体的快速视听时间再校准效应会保持在更低的水平上。

5.3 发展性阅读障碍视听时间再校准缺陷的神经基础

Simon 等(2017, 2018)考察了快速视听时间再校准在时间进程上的神经基础，研究者使用同时性判断任务并以言语或非言语刺激为材料，发现当前试次的事件相关电位(event-related potentials, ERPs)会受到前一个试次视听刺激呈现通道顺序的调节。具体表现为：（1）当视、听觉刺激间的 SOA 较小时(e.g., 300 ms)，在中央区和顶叶区，当前试次第二个刺激呈现后约 125 ms 的 ERPs 波幅受前一个试次视听刺激呈现通道顺序的影响，顺序一致条件诱发的波幅显著低于顺序不一致条件。该结果表明，对异步时间较短的视听刺激的再校准可以发生在与刺激评估和决策相关的高阶认知过程中(Simon et al., 2017)。（2）当视、听觉刺激间的 SOA 较大时(e.g., 450 ms)，当前试次第一个刺激呈现后约 300 ms 的 ERPs 波幅同

样受前一个试次视听刺激呈现通道顺序的影响，顺序一致条件诱发的波幅显著低于顺序不一致条件。这表明当视听刺激间的 SOA 足够大时，神经适应也可以发生在第二个刺激呈现前的早期感觉加工中(Simon et al., 2018)。不过，由于 DD 个体不具备快速的神经适应能力(e.g., Jaffe-Dax et al., 2018; Perrachione et al., 2016; Peter et al., 2019)，传统的同时性判断任务所使用的实验材料无法直接应用于阅读障碍的研究。这是因为同一种刺激的反复呈现无法说明最终的结果是快速视听时间再校准缺陷导致的，还是单纯的对重复刺激的适应缺陷导致的。有研究发现，快速视听时间再校准主要是由基础的时间因素所驱动的，即使前后两个视听刺激不同或者同一个视听刺激来源不匹配(例如: 女性面孔的说话动作配对男性的声音)，快速视听时间再校准仍然会发生(Van der Burg & Goodbourn, 2015)。因此，未来针对 DD 的研究可以在任务中使用不同的视听刺激组合，从而控制个体在适应重复刺激方面存在缺陷的干扰。可以假设，DD 个体由当前试次诱发的 ERPs 波幅很难受到前一个试次视听刺激呈现通道顺序的影响，表现出快速视听时间再校准缺陷。此外，大脑结构和功能层面的研究发现，内侧顶叶皮层作为神经中枢保持着各通道的感觉表征，并灵活地将过去与当前的信息联系起来，从而引导视听再校准这种适应行为(Park & Kayser, 2019)。并且，视听跨通道音素再校准伴随着颞叶皮层、顶叶、脑岛和运动区的显著激活(Ullas et al., 2020)。因此，DD 视听时间再校准缺陷的神经基础可能表现为上述脑区的结构和功能受损。

5.4 发展性阅读障碍者视听时间再校准能力与阅读的关系

研究发现，视听时间再校准能力与视听时间整合能力存在显著的相关关系(Harvey et al., 2014; Noel et al., 2016; Van der Burg et al., 2013)，并且正常阅读者的视听时间整合能力可以通过快速命名和正字法技能影响阅读(Liu et al., 2019)，提示视听时间再校准能力也可能通过这些阅读相关认知技能间接影响阅读。阅读障碍的一个重要致病因素是排列字母及其声音顺序的能力差，导致字母识别速度变慢(Vidyasagar & Pammer, 2010)，并且这种快速时间加工缺陷也会造成字母位置和整体字形感知的受损，导致习得字形–音素对应关系的能力出现问题(Hood & Conlon, 2004)。时间再校准可以通过接收新的时间关系(例如: 视听刺激间的时间延迟)不断形成新的先验知识，而这些先验知识会影响随后的时序知觉(Sato & Aihara, 2011)。并且，时间再校准初始阶段 TBW 的增大也反映了大脑可以通过降低时序判断的分辨率，来减小相继出现的感觉刺激所带来的不适，从而有助于形成整合的知觉与记忆(袁祥勇, 黄希庭, 2011)。因此，如果 DD 个体的视听时间再校准能力存在缺陷，就会影响其快速时间加工能力和视听整合能力，导致语音加工、快速命名以及正字法加工等一系列困难，最终造成阅读能力受损。综上所述，探讨 DD 视听时间再校准能力与阅读的关系，将有助

于我们更深入地了解 DD 发生的本质。

5.5 发展性阅读障碍与视听时间再校准缺陷的因果关系

如果 DD 个体的视听时间再校准能力存在缺陷，那么这种缺陷是造成 DD 的原因？还是未能习得阅读、阅读水平低下的结果？Li 等(2019)的研究发现，阅读障碍者和正常阅读者的视听跨通道时间整合能力对阅读的影响路径不同，即正常阅读者的视听跨通道时间整合可以通过快速命名和正字法技能影响阅读，阅读障碍者则不存在这样的影响路径(Liu et al., 2019)。但是，仅以数据驱动的路径分析结果并不能证明因果关系。证明视听时间再校准缺陷会导致阅读障碍的最有说服力的方法是证明改善快速视听时间再校准能力的干预措施也能提高阅读能力。值得注意的是，De Niear 等(2017)使用同时性判断任务探索了反馈信号对快速视听时间再校准的作用。结果发现，与没有反馈的条件相比，被试在接收反馈后表现出更强的快速视听时间再校准。这一结果表明，反馈信号在快速的试次间(trial-to-trial)学习过程中维持和促进了快速视听时间再校准能力(De Niear et al., 2017)。那么，将提供反馈信号的视听同时性判断任务作为训练项目就可能是提高个体视听时间再校准能力的有效手段。可以推测，具有视听时间再校准缺陷的群体能从有反馈的视听时间再校准训练中获益，并有希望进一步改善其更高级的认知功能(例如: 阅读)。因此，如果能将视听时间再校准训练应用于 DD 群体，一方面有助于阐明视听时间再校准缺陷与 DD 的因果关系，另一方面有助于开发出一种针对 DD 的干预措施。

参考文献

李涛涛, 胡金生, 王琦, 李骋诗, 李松泽, 何建青, ... 刘淑清. (2018). 孤独症谱系障碍者的视听时间整合. *心理科学进展*, *26*(6), 1031–1040.

武慧多. (2020). *发展性阅读障碍儿童视听时间敏感性及其对阅读能力的影响*(博士学位论文). 华东师范大学, 上海.

袁祥勇, 黄希庭. (2011). 多感觉整合的时间再校准. *心理科学进展*, *19*(5), 692–700.

袁祥勇, 黄希庭, 毕翠华, 袁宏. (2012). 视听时间再校准: 适应空间与适应客体的联合及独立作用. *心理学报*, *44*(2), 143–153.

Adhikari, B. M., Goshorn, E. S., Lamichhane, B., & Dhamala, M. (2013). Temporal-order judgment of audiovisual events involves network activity between parietal and prefrontal cortices. *Brain Connectivity*, *3*(5), 536–545.

Anthony, J. L., & Lonigan, C. J. (2004). The nature of phonological awareness: Converging evidence from four studies of preschool and early grade school children. *Journal of Educational Psychology*, *96*(1), 43–55.

Arrighi, R., Alais, D., & Burr, D. (2006). Perceptual synchrony of audiovisual streams for natural and artificial motion sequences. *Journal of Vision*, *6*(3), 260–268.

Binder, M. (2015). Neural correlates of audiovisual temporal processing-comparison of temporal order and simultaneity judgments. *Neuroscience*, *300*, 432–447.

Blau, V., Reithler, J., van Atteveldt, N., Seitz, J., Gerretsen, P., Goebel, R., & Blomert, L. (2010). Deviant processing of letters and speech sounds as proximate cause of reading failure: A functional magnetic resonance imaging study of dyslexic children. *Brain*, *133*(3), 868–879.

Blau, V., van Atteveldt, N., Ekkebus, M., Goebel, R., & Blomert, L. (2009). Reduced neural integration of letters and speech sounds links phonological and reading deficits in adult dyslexia. *Current Biology*, *19*(6), 503–508.

Casini, L., Pech-Georgel, C., & Ziegler, J. C. (2018). It's about time: Revisiting temporal processing deficits in dyslexia. *Developmental Science*, *21*(2), e12530. https://doi.org/10.1111/desc.12530

De Niear, M. A., Noel, J. P., & Wallace, M. T. (2017). The impact of feedback on the different time courses of multisensory temporal recalibration. *Neural Plasticity*, *2017*, 3478742. https://doi.org/10.1155/2017/3478742

Dhamala, M., Assisi, C. G., Jirsa, V. K., Steinberg, F. L., & Kelso, J. S. (2007). Multisensory integration for timing engages different brain networks. *NeuroImage*, *34*(2), 764–773.

Ehri, L. C. (2005). Learning to read words: Theory, findings, and issues. *Scientific Studies of Reading*, *9*(2), 167–188.

Ernst, M. O., & Banks, M. S. (2002). Humans integrate visual and haptic information in a statistically optimal fashion. *Nature*, *415*(6870), 429–433.

Ernst, M. O., & Bülthoff, H. H. (2004). Merging the senses into a robust percept. *Trends in Cognitive Sciences*, *8*(4), 162–169.

Francisco, A. A., Groen, M. A., Jesse, A., & McQueen, J. M. (2017). Beyond the usual cognitive suspects: The importance of speechreading and audiovisual temporal sensitivity in reading ability. *Learning and Individual Differences*, *54*, 60–72.

Francisco, A. A., Jesse, A., Groen, M. A., & McQueen, J. M. (2017). A general audiovisual temporal processing deficit in adult readers with dyslexia. *Journal of Speech, Language, and Hearing Research*, *60*(1), 144–158.

Francisco, A. A., Jesse, A., & McQueen, J. M. (2014, September). Audiovisual temporal sensitivity in typical and dyslexic adult readers. In *Interspeech 2014: 15th Annual Conference of the International Speech Communication Association* (pp. 2575–2579), Singapore.

Froyen, D., van Atteveldt, N., Bonte, M., & Blomert, L. (2008). Cross-modal enhancement of the MMN to speech-

sounds indicates early and automatic integration of letters and speech-sounds. *Neuroscience Letters*, *430*(1), 23–28.

Froyen, D., Willems, G., & Blomert, L. (2011). Evidence for a specific cross-modal association deficit in dyslexia: An electrophysiological study of letter-speech sound processing. *Developmental Science*, *14*(4), 635–648.

Fujisaki, W., Shimojo, S., Kashino, M., & Nishida, S. Y. (2004). Recalibration of audiovisual simultaneity. *Nature Neuroscience*, *7*(7), 773–778.

Gori, M., Ober, K. M., Tinelli, F., & Coubard, O. A. (2020). Temporal representation impairment in developmental dyslexia for unisensory and multisensory stimuli. *Developmental Science*, e12977. https://doi.org/10.1111/desc.12977

Hairston, W. D., Burdette, J. H., Flowers, D. L., Wood, F. B., & Wallace, M. T. (2005). Altered temporal profile of visual-auditory multisensory interactions in dyslexia. *Experimental Brain Research*, *166*(3–4), 474–480.

Harvey, C., van der Burg, E., & Alais, D. (2014). Rapid temporal recalibration occurs crossmodally without stimulus specificity but is absent unimodally. *Brain Research*, *1585*, 120–130.

Hood, M., & Conlon, E. (2004). Visual and auditory temporal processing and early reading development. *Dyslexia*, *10*(3), 234–252.

Jaffe-Dax, S., Kimel, E., & Ahissar, M. (2018). Shorter cortical adaptation in dyslexia is broadly distributed in the superior temporal lobe and includes the primary auditory cortex. *eLife*, *7*, e30018. https://doi.org/10.7554/eLife.30018.001

Keetels, M., Bonte, M., & Vroomen, J. (2018). A selective deficit in phonetic recalibration by text in developmental dyslexia. *Frontiers in Psychology*, *9*, 710. https://doi.org/10.3389/fpsyg.2018.00710

Keetels, M., & Vroomen, J. (2007). No effect of auditory-visual spatial disparity on temporal recalibration. *Experimental Brain Research, 182*(4), 559–565.

Kotz, S. A., & Schwartze, M. (2010). Cortical speech processing unplugged: A timely subcortico-cortical framework. *Trends in Cognitive Sciences*, *14*(9), 392–399.

Laasonen, M., Service, E., & Virsu, V. (2002). Crossmodal temporal order and processing acuity in developmentally dyslexic young adults. *Brain and Language*, *80*(3), 340–354.

Lewkowicz, D. J. (1992). The development of temporally-based intersensory perception in human infants. In F. Macar, V. Pouthas & W. J. Friedman (Eds.), *Time, Action, and Cognition: Towards Bridging the Gap* (Vol. 66, pp. 33–43). Springer, Dordrecht.

Lewkowicz, D. J. (1994). Development of intersensory perception in human infants. In D. J. Lewkowicz & R.

Lickliter (Eds.), *The Development of Intersensory Perception: Comparative Perspectives* (pp. 165–203). Psychology Press.

Lewkowicz, D. J. (1996). Perception of auditory-visual temporal synchrony in human infants. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, *22*(5), 1094–1106.

Liu, S., Wang, L. C., & Liu, D. (2019). Auditory, visual, and cross-modal temporal processing skills among Chinese children with developmental dyslexia. *Journal of Learning Disabilities*, *52*(6), 431–441.

Meredith, M. A., Nemitz, J. W., & Stein, B. E. (1987). Determinants of multisensory integration in superior colliculus neurons. I. Temporal factors. *Journal of Neuroscience*, *7*(10), 3215–3229.

Mittag, M., Thesleff, P., Laasonen, M., & Kujala, T. (2013). The neurophysiological basis of the integration of written and heard syllables in dyslexic adults. *Clinical Neurophysiology*, *124*(2), 315–326.

Mossbridge, J., Zweig, J., Grabowecky, M., & Suzuki, S. (2017). An association between auditory-visual synchrony processing and reading comprehension: Behavioral and electrophysiological evidence. *Journal of Cognitive Neuroscience*, *29*(3), 435–447.

Navarra, J., Hartcher-O'Brien, J., Piazza, E., & Spence, C. (2009). Adaptation to audiovisual asynchrony modulates the speeded detection of sound. *Proceedings of the National Academy of Sciences, 106*(23), 9169–9173.

Navarra, J., Soto-Faraco, S., & Spence, C. (2007). Adaptation to audiotactile asynchrony. *Neuroscience Letters, 413*(1), 72–76.

Navarra, J., Vatakis, A., Zampini, M., Soto-Faraco, S., Humphreys, W., & Spence, C. (2005). Exposure to asynchronous audiovisual speech extends the temporal window for audiovisual integration. *Cognitive Brain Research, 25*(2), 499–507.

Noel, J. P., De Niear, M. A., Stevenson, R., Alais, D., & Wallace, M. T. (2017). Atypical rapid audio-visual temporal recalibration in autism spectrum disorders. *Autism Research*, *10*(1), 121–129.

Noel, J. P., De Niear, M. A., van der Burg, E., & Wallace, M. T. (2016). Audiovisual simultaneity judgment and rapid recalibration throughout the lifespan. *PloS One*, *11*(8), e0161698. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0161698

Noesselt, T., Rieger, J. W., Schoenfeld, M. A., Kanowski, M., Hinrichs, H., Heinze, H. J., & Driver, J. (2007). Audiovisual temporal correspondence modulates human multisensory superior temporal sulcus plus primary sensory cortices. *Journal of Neuroscience*, *27*(42), 11431–11441.

O'Connor, I. M., & Klein, P. D. (2004). Exploration of strategies for facilitating the reading comprehension of high-functioning students with autism spectrum disorders. *Journal of Autism and Developmental Disorders*, *34*(2), 115–127.

Ozernov-Palchik, O., Beach, S. D., Brown, M., Centanni, T. M., Gaab, N., Kuperberg, G., Perrachione, T. K., & Gabrieli, J. D. E. (2021). Speech-specific perceptual adaptation deficits in children and adults with dyslexia. *Journal of Experimental Psychology: General.* Advance online publication. https://doi.org/10.1037/xge0001145

Pammer, K., & Vidyasagar, T. R. (2005). Integration of the visual and auditory networks in dyslexia: A theoretical perspective. *Journal of Research in Reading*, *28*(3), 320–331.

Park, H., & Kayser, C. (2019). Shared neural underpinnings of multisensory integration and trial-by-trial perceptual recalibration in humans. *eLife*, *8*, e47001. https://doi.org/10.7554/eLife.47001.001

Patti, P. J., & Lupinetti, L. (1993). Brief report: Implications of hyperlexia in an autistic savant. *Journal of Autism and Developmental Disorders*, *23*(2), 397–405.

Pellicano, E., & Burr, D. (2012). When the world becomes 'too real': A Bayesian explanation of autistic perception. *Trends in Cognitive Sciences*, *16*(10), 504–510.

Perrachione, T. K., Del Tufo, S. N., Winter, R., Murtagh, J., Cyr, A., Chang, P., ... Gabrieli, J. D. (2016). Dysfunction of rapid neural adaptation in dyslexia. *Neuron*, *92*(6), 1383–1397.

Peter, B., McCollum, H., Daliri, A., & Panagiotides, H. (2019). Auditory gating in adults with dyslexia: An ERP account of diminished rapid neural adaptation. *Clinical Neurophysiology*, *130*(11), 2182–2192.

Powers, A. R., Hevey, M. A., & Wallace, M. T. (2012). Neural correlates of multisensory perceptual learning. *Journal of Neuroscience*, *32*(18), 6263–6274.

Powers, A. R., Hillock, A. R., & Wallace, M. T. (2009). Perceptual training narrows the temporal window of multisensory binding. *Journal of Neuroscience*, *29*(39), 12265–12274.

Rüsseler, J., Ye, Z., Gerth, I., Szycik, G. R., & Münte, T. F. (2018). Audio-visual speech perception in adult readers with dyslexia: An fMRI study. *Brain Imaging and Behavior*, *12*(2), 357–368.

Sato, Y., & Aihara, K. (2011). A Bayesian model of sensory adaptation. *PloS One*, *6*(4), e19377. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0019377

Simon, D. M., Nidiffer, A. R., & Wallace, M. T. (2018). Single trial plasticity in evidence accumulation underlies rapid recalibration to asynchronous audiovisual speech. *Scientific Reports*, *8*(1), 12499. https://doi.org/10.1038/s41598-018-30414-9

Simon, D. M., Noel, J. P., & Wallace, M. T. (2017). Event related potentials index rapid recalibration to audiovisual temporal asynchrony. *Frontiers in Integrative Neuroscience*, *11*, 8. https://doi.org/10.3389/fnint.2017.00008

Stevenson, R. A., Fister, J. K., Barnett, Z. P., Nidiffer, A. R., & Wallace, M. T. (2012). Interactions between the

spatial and temporal stimulus factors that influence multisensory integration in human performance. *Experimental Brain Research, 219*(1), 121–137.

Stevenson, R. A., Segers, M., Ferber, S., Barense, M. D., Camarata, S., & Wallace, M. T. (2016). Keeping time in the brain: Autism spectrum disorder and audiovisual temporal processing. *Autism Research*, *9*(7), 720–738.

Stevenson, R. A., & Wallace, M. T. (2013). Multisensory temporal integration: Task and stimulus dependencies. *Experimental Brain Research, 227*(2), 249–261.

Theves, S., Chan, J. S., Naumer, M. J., & Kaiser, J. (2020). Improving audio-visual temporal perception through training enhances beta-band activity. *NeuroImage*, *206*, 116312. https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2019.116312

Turi, M., Karaminis, T., Pellicano, E., & Burr, D. (2016). No rapid audiovisual recalibration in adults on the autism spectrum. *Scientific Reports*, *6*, 21756. https://doi.org/10.1038/srep21756

Ullas, S., Hausfeld, L., Cutler, A., Eisner, F., & Formisano, E. (2020). Neural correlates of phonetic adaptation as induced by lexical and audiovisual context. *Journal of Cognitive Neuroscience*, *32*(11), 2145–2158.

Van der Burg, E., Alais, D., & Cass, J. (2013). Rapid recalibration to audiovisual asynchrony. *Journal of Neuroscience*, *33*, 14633–14637.

Van der Burg, E., Alais, D., & Cass, J. (2015). Audiovisual temporal recalibration occurs independently at two different time scales. *Scientific Reports*, *5*, 14526. https://doi.org/10.1038/srep14526

Van der Burg, E., & Goodbourn, P. T. (2015). Rapid, generalized adaptation to asynchronous audiovisual speech. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, *282*(1804), 20143083. https://doi.org/10.1098/rspb.2014.3083

Van Wassenhove, V., Grant, K. W., & Poeppel, D. (2007). Temporal window of integration in auditory-visual speech perception. *Neuropsychologia*, *45*(3), 598–607.

Vidyasagar, T. R., & Pammer, K. (2010). Dyslexia: A deficit in visuo-spatial attention, not in phonological processing. *Trends in Cognitive Sciences*, *14*(2), 57–63.

Virsu, V., Lahti-Nuuttila, P., & Laasonen, M. (2003). Crossmodal temporal processing acuity impairment aggravates with age in developmental dyslexia. *Neuroscience Letters*, *336*(3), 151–154.

Vroomen, J., & Keetels, M. (2010). Perception of intersensory synchrony: A tutorial review. *Attention, Perception, and Psychophysics*, *72*(4), 871–884.

Wallace, M. T., & Stevenson, R. A. (2014). The construct of the multisensory temporal binding window and its dysregulation in developmental disabilities. *Neuropsychologia*, *64*, 105–123.

Woynaroski, T. G., Kwakye, L. D., Foss-Feig, J. H., Stevenson, R. A., Stone, W. L., & Wallace, M. T. (2013). Multisensory speech perception in children with autism spectrum disorders. *Journal of Autism and Developmental Disorders*, *43*(12), 2891–2902.

Yu, L., Stein, B. E., & Rowland, B. A. (2009). Adult plasticity in multisensory neurons: Short-term experience-dependent changes in the superior colliculus. *Journal of Neuroscience*, *29*(50), 15910–15922.

Zaidel, A., Goin-Kochel, R. P., & Angelaki, D. E. (2015). Self-motion perception in autism is compromised by visual noise but integrated optimally across multiple senses. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, *112*(20), 6461–6466.

Zhou, H. Y., Cheung, E. F., & Chan, R. C. (2020). Audiovisual temporal integration: Cognitive processing, neural mechanisms, developmental trajectory and potential interventions. *Neuropsychologia*, *140*, 107396. https://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2020.107396

Zhou, H. Y., Shi, L. J., Yang, H. X., Cheung, E. F., & Chan, R. C. (2020). Audiovisual temporal integration and rapid temporal recalibration in adolescents and adults: Age-related changes and its correlation with autistic traits. *Autism Research*, *13*(4), 615–626.

A possible mechanism for the audiovisual temporal integration deficits in developmental dyslexia: Impaired ability in audiovisual temporal recalibration

WANG Runzhou, BI Hongyan

(*CAS Key Laboratory of Behavioral Science; Center for Brain Science and Learning Difficulties, Institute of Psychology, Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100101, *China*)

(*Department of Psychology, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*)

Abstract: The nature of deficits of dyslexia has been under debate for a long time. A large number of studies have revealed that the dyslexics suffer from impaired audiovisual temporal integration. However, these studies only examined the overall performance of audiovisual temporal integration, and neglected to explore its dynamic process over time. Audiovisual temporal recalibration is an indicator describing the dynamic process of audiovisual temporal integration. Difficulty in recalibrating the differences between internal temporal representations and sensory inputs leads to

impaired multisensory integration. Given that developmental dyslexics have deficits in recalibration-related abilities, the essence of the deficit in audiovisual temporal integration in developmental dyslexia may be impaired audiovisual temporal recalibration. Future studies could examine the specific performances of audiovisual temporal recalibration in developmental dyslexia, as well as its cognitive and neural mechanisms.

Key words: developmental dyslexia, audiovisual temporal integration, audiovisual temporal recalibration, dynamic processing, Bayesian theory